

铝酸钠溶液中 S^{2-} 浓度对 20Cr 钢腐蚀行为的影响

周鑫强^{1,2}, 陈朝轶^{1,2}, 付慧^{1,2}, 陈吕^{1,2}, 杨彬^{1,2}, 龙玉斌^{1,2}

(1. 贵州大学 材料与冶金学院, 贵阳 550025;

2. 贵州省冶金工程与过程节能重点实验室, 贵阳 550025)

摘要: 目的 研究 20Cr 钢在铝酸钠溶液中不同 S^{2-} 浓度下的腐蚀行为及产物形成过程, 探索腐蚀机理。方法 20Cr 钢在不同 S^{2-} 浓度的溶液中进行高温浸泡腐蚀实验与电化学测试, 结合扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线能谱仪 (EDS)、X 射线衍射仪 (XRD) 等分析技术, 观察腐蚀产物的微观形貌、元素含量与组成。运用失重法、极化曲线和交流阻抗图分析样品的腐蚀速率。结果 S^{2-} 质量浓度从 0 g/L 增加到 5 g/L 时, 腐蚀速率由 3.43 g/(m²·d) 上升到 25.20 g/(m²·d), 腐蚀产物逐渐增多, S^{2-} 质量浓度在 6 g/L 时, 腐蚀速率下降到 21.30 g/(m²·d)。EDS 结果表明, 随 S^{2-} 浓度的增加, 腐蚀产物中铬元素含量增加, 铁元素总体含量降低, 氧、铝元素含量呈现先增长后降低趋势。XRD 结果显示, 加入 S^{2-} 与未加 S^{2-} 相比, 腐蚀产物物相组成由 Fe₃O₄ 和 FeOOH 变为 Fe₃O₄、FeCr₂O₄ 和 FeS。电化学测试得到 S^{2-} 质量浓度从 0 g/L 到 5 g/L 时, 腐蚀电流密度由 22.87 μA/cm² 上升到 586.02 μA/cm², S^{2-} 质量浓度在 6 g/L 时, 电流密度下降到 183.06 μA/cm²。结论 S^{2-} 质量浓度在 0~5 g/L 范围时, 20Cr 钢的腐蚀速率逐渐增加, 腐蚀产物中形成 FeS, S^{2-} 的加入能够促进腐蚀反应, 破坏未加入硫元素时形成的较致密腐蚀物; 当 S^{2-} 质量浓度超过 5 g/L 后, 形成致密的 FeCr₂O₄ 尖晶石氧化物, 粘附在试样表面, 对腐蚀起到抑制作用。

关键词: 20Cr 钢; S^{2-} 浓度; 铝酸钠溶液; 高温浸泡腐蚀; 电化学

中图分类号: TG172 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2019)12-0264-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.12.032

Effect of S^{2-} Concentration on Corrosion Behavior of 20Cr Steel in Sodium Aluminate Solution

ZHOU Xin-qiang^{1,2}, CHEN Chao-yi^{1,2}, FU Hui^{1,2}, CHEN Lyu^{1,2}, YANG Bin^{1,2}, LONG Yu-bin^{1,2}

(1. School of Materials and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Key Laboratory of Metallurgical Engineering and Process Energy Conservation of Guizhou Province, Guiyang 550025, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the corrosion mechanism and corrosion process of 20Cr steel in different sodium aluminate solutions with different S^{2-} concentrations. 20Cr steel was subjected to high temperature immersion corrosion test and electrochemical test in different S^{2-} concentration solutions. Combined with scanning electron microscope (SEM), X-ray energy

收稿日期: 2019-03-23; 修订日期: 2019-05-31

Received: 2019-03-23; Revised: 2019-05-31

基金项目: 国家自然科学基金 (51574095, 517741022, 51664005); 贵州省教育厅项目 (黔教合 KY (2015) 334); 黔科合平台人才 ([2017]5626、[2017]5788); 贵大 SRT 字 (2017) 012

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51574095, 517741022, 51664005), Education Department of Guizhou (Project of Guizhou Education Department ky(2015)334), Guizhou Province Science Direction Contract Platform Talent ([2017]5626 and [2017]5788), SRT Program of Guizhou University(2017)012

通讯作者: 陈朝轶 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事资源利用及材料腐蚀研究。邮箱: 546892428@qq.com

Corresponding author: CHEN Chao-yi (1977—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: resource utilization and material corrosion study. E-mail: 546892428@qq.com

disperse spectroscopy (EDS), X-ray diffraction (XRD) and other analytical techniques, the microstructure, element content and composition of corrosion products were observed. The corrosion rate of the sample was analyzed by weight loss method, polarization curve and AC impedance map. With the concentration of S^{2-} from 0 g/L to 5 g/L, the corrosion rate increased from 3.43 g/(m²·d) to 25.20 g/(m²·d), and the corrosion product increased gradually. The corrosion rate decreased to 21.30 g/(m²·d) when the concentration of S^{2-} was 6 g/L. The results of EDS showed that with the increase of S^{2-} concentration, the content of chromium in corrosion products increased, the total content of iron decreased, and the content of oxygen and aluminum increased first and then decreased. XRD results showed that the phase composition of the corrosion product changed from Fe₃O₄ and FeOOH to Fe₃O₄, FeCr₂O₄ and FeS after S^{2-} was added. Electrochemical tests showed that when the S^{2-} concentration ranged from 0 g/L to 5 g/L, the corrosion current density increased from 22.87 μA/cm² to 586.02 μA/cm², and when the S^{2-} concentration was 6 g/L, the current density decreased to 183.06 μA/cm². When the concentration of S^{2-} is in the range of 0~5 g/L, the corrosion rate of 20Cr steel increases gradually, and FeS is formed in the corrosion product. The addition of S^{2-} can promote the corrosion reaction and destroy the dense corrosive formed when no sulfur element is added. After the S^{2-} concentration exceeds 5 g/L, a dense FeCr₂O₄ spinel oxide is formed, which adheres to the surface of the sample and inhibits corrosion.

KEY WORDS: 20Cr steel; S^{2-} concentration; sodium aluminate solution; electrochemistry; high temperature immersion corrosion

近年来,我国铝工业发展迅速,优质铝土矿资源日趋紧缺,而大量高硫铝土矿由于硫的危害未能获得较好的工业应用,高品位的高硫铝土矿满足拜耳法生产氧化铝的要求,但需要进行脱硫处理,选矿法与焙烧法能脱除大部分硫^[1-3],剩余的硫在拜耳溶出过程中首先以 S^{2-} 形式转入铝酸钠溶液^[4-7],并不断积累,对设备材质会造成腐蚀危害,高硫铝土矿直接溶出,硫的腐蚀更严重,甚至引发事故^[8-9],造成巨大的经济损失。目前,在氧化铝工业上关于硫对低碳钢金属设备的腐蚀行为研究较少,而在石油化工方面相对比较成熟^[10-14]。陈朝轶等^[15-16]已根据企业生产具体腐蚀现状,在模拟拜耳溶液环境下,针对氧化铝生产设备材料 16Mn 钢材进行了各价态硫元素的腐蚀行为研究。但尚未有硫对溶出罐体材质 20Cr 低合金钢的腐蚀研究。因此,本文在模拟生产条件下,结合浸泡腐蚀与电化学腐蚀,研究铝酸钠溶液中低价态硫 S^{2-} 对 20Cr 钢的腐蚀行为,并探索腐蚀行为机理。

1 材料与方法

20Cr 钢通过 Q4-130 TASMAN 全谱直读火花光谱仪进行元素含量分析,化学成分见表 1 所示。将 20Cr 钢材切割成尺寸为 20 mm×15 mm×3 mm 的试样,实验前先用 180#、240#、360#、600#、800#、1000#、1200#、1500#金相砂纸逐级打磨到平整,对表面进行抛光,然后用棉花蘸取酒精去除污渍,再用蒸馏水冲洗干净,冷风吹干,并记录试样的尺寸和质量。

采用高压釜进行高温浸泡腐蚀,温度设定为 110 ℃,腐蚀周期 5 d。铝酸钠溶液腐蚀介质中,Al₂O₃

为 130 g/L, Na₂O_k 为 255 g/L, S^{2-} 质量浓度分别为 0、3、4、5、6 g/L。浸泡结束后,用蒸馏水冲洗试样,冷风干燥,采用 SUPRA 40 型热场发射扫描电子显微镜(德国,蔡司)、X' Pert Powder 型高温 X 射线衍射仪(荷兰,帕纳斯),分别对试样表面腐蚀产物进行形貌、化学成分、相结构的分析。根据 GB/T 1645—1996《金属和合金的腐蚀-腐蚀试样上腐蚀产物的去除》^[17]方法清理去除腐蚀产物,获取失重数据,计算腐蚀速率。电化学^[18]腐蚀实验采用法国 EC-LAB VMP3 系列, VSP 多通道电化学工作站(5 通道)设备进行,参比电极为饱和甘汞电极(SCE),辅助电极为铂电极,工作电极为 20Cr 钢,测试面积为 1 cm²,采用环氧树脂密封。试样在恒温(65 ℃)水浴环境,同高温浸泡实验腐蚀介质中浸泡 5 d 后开始测试,开路电位稳定时长 40 min,动电位极化曲线测试的扫描电位范围为-1.7~0.5 V,扫描速率为 0.5 mV/s,交流阻抗谱实验振幅约为±10 mV,频率为 10⁻²~10⁴ Hz。

表 1 20Cr 钢材化学成分表
Tab.1 Table of chemical composition of 20Cr steel
wt. %

C	Si	Mn	Cr	Fe
0.22	0.32	0.71	1.00	Bal.

2 结果与讨论

2.1 腐蚀的微观分析

2.1.1 腐蚀产物微观形貌及元素分布

图 1 为 20Cr 钢材在不同 S^{2-} 浓度的铝酸钠溶液中

腐蚀 5 d 后的扫描电镜微观形貌。如图 1 所示, S^{2-} 质量浓度为 0 g/L 时, 20Cr 钢试样附着的腐蚀产物呈现细沙状, 而大部分颗粒为银灰色, 均匀腐蚀。当 S^{2-} 含量提高时, 松散黑色产物堆积, 腐蚀层厚度增加; 当 S^{2-} 质量浓度增至 5 g/L 时, 部分疏松多孔的腐

蚀产物脱离 20Cr 试样表面, 导致产物层厚度有明显差异, 平整度最低, 腐蚀最严重。 S^{2-} 质量浓度增加到 6 g/L 后, 腐蚀产物的间距增大, 低浓度时所表现出的灰白色开始恢复, 并呈蜂窝状, 其结构极不稳定, 但未呈现出脱落痕迹。

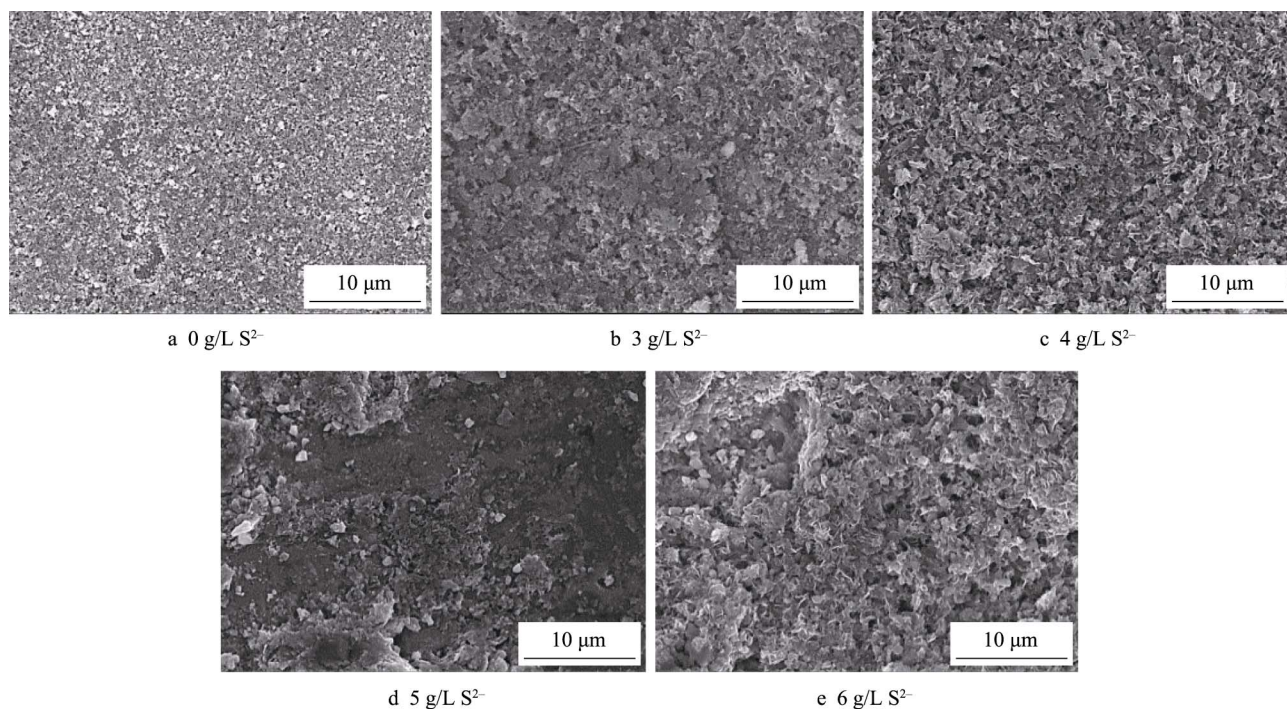


图 1 20Cr 钢在不同 S^{2-} 浓度的铝酸钠溶液中腐蚀 5 d 后的表面微观形貌
Fig.1 Surface micro-morphology of 20Cr steel after corrosion for 5 days in different S^{2-} concentrations of sodium aluminate solution

图 2 为不同 S^{2-} 浓度铝酸钠溶液中 20Cr 钢试样腐蚀 5 d 后的面扫结果。 S^{2-} 质量浓度为 0 g/L 时, 腐蚀较轻, 腐蚀产物结构较稳定, 均匀分布在试样表面; S^{2-} 质量浓度为 3 g/L 时, 零星的腐蚀点扩散为腐蚀纹路, 腐蚀产物层加厚, 部分区域出现凝絮现象, 腐蚀加剧; 当 S^{2-} 质量浓度为 4 g/L 时, 表面有明显凹槽, 这是腐蚀产物脱落而致, 表明腐蚀加快; S^{2-} 质量浓度为 5 g/L 时, 颜色进一步加深, 腐蚀产物愈加疏松且成块状脱落, 腐蚀程度加剧; S^{2-} 质量浓度继续增加到 6 g/L 时, 同样出现凝絮现象, 腐蚀试样表面未曾出现腐蚀产物的脱落, 分析认为, 这是由于生成的氧化物在试样表面形成一层致密的钝化膜, 阻碍腐蚀进一步加剧。因而, 当 S^{2-} 质量浓度达到 5 g/L 时, 存在的腐蚀产物较多, 腐蚀状况最严重。

表 2 为铝酸钠溶液中不同 S^{2-} 浓度下腐蚀区域 EDS 分析结果 (能谱图见图 2)。由表 2 可知, 铝酸钠溶液中, 20Cr 钢材在不同 S^{2-} 浓度下生成的腐蚀产物主要含有 Fe、O、S、Cr, 并伴有少量的 Al、Si、Mn 等元素。但是由表 1 中 20Cr 钢材的化学组成可知, 基体本身并不含有氧元素, 而 EDS 能谱分析结果中

出现了氧元素, 表明氧元素参与腐蚀, 成为腐蚀产物的组成成分。随着 S^{2-} 浓度的增加, 氧元素含量总体增加, S^{2-} 质量浓度为 5 g/L 时, 氧元素含量最高, 这是由于腐蚀最严重, 5 g/L 后, S^{2-} 抑制了腐蚀氧元素含量降低, 腐蚀加剧导致腐蚀产物中氧含量增加。起主要加剧腐蚀作用的硫在腐蚀所得物中的含量随着 S^{2-} 浓度的增加, 整体呈现先降低后增加的趋势, 然而当 S^{2-} 质量浓度为 5 g/L 时, 腐蚀产物中硫的含量急剧减少, 结合图 1 可知, 主要是由于腐蚀产物 (FeS) 结构疏松, 在 S^{2-} 质量浓度为 5 g/L 时, 出现局部脱落现象, 故而脱落的腐蚀产物带走部分硫元素, 因此试样表面腐蚀产物中硫元素含量较少。此外, 腐蚀产物中 Cr 元素含量的富集^[19-21], 较高 Cr/Fe 比的钝化膜具有保护性^[22], 成为导致 S^{2-} 质量浓度为 6 g/L 时腐蚀速率下降的主要影响因素。由表 2 可知, 加入 S^{2-} 后, Cr/Fe 比在 S^{2-} 质量浓度为 6 g/L 时最高, Cr 元素富集, 腐蚀速率下降。XRD 表明, Cr 在腐蚀介质中与基体反应后以 $FeCr_2O_4$ 形式存在, Fe-Cr-O 化合物分布腐蚀产物之中, 使得原有的疏松结构变致密, 稳定性得以增强, 进而减缓腐蚀。

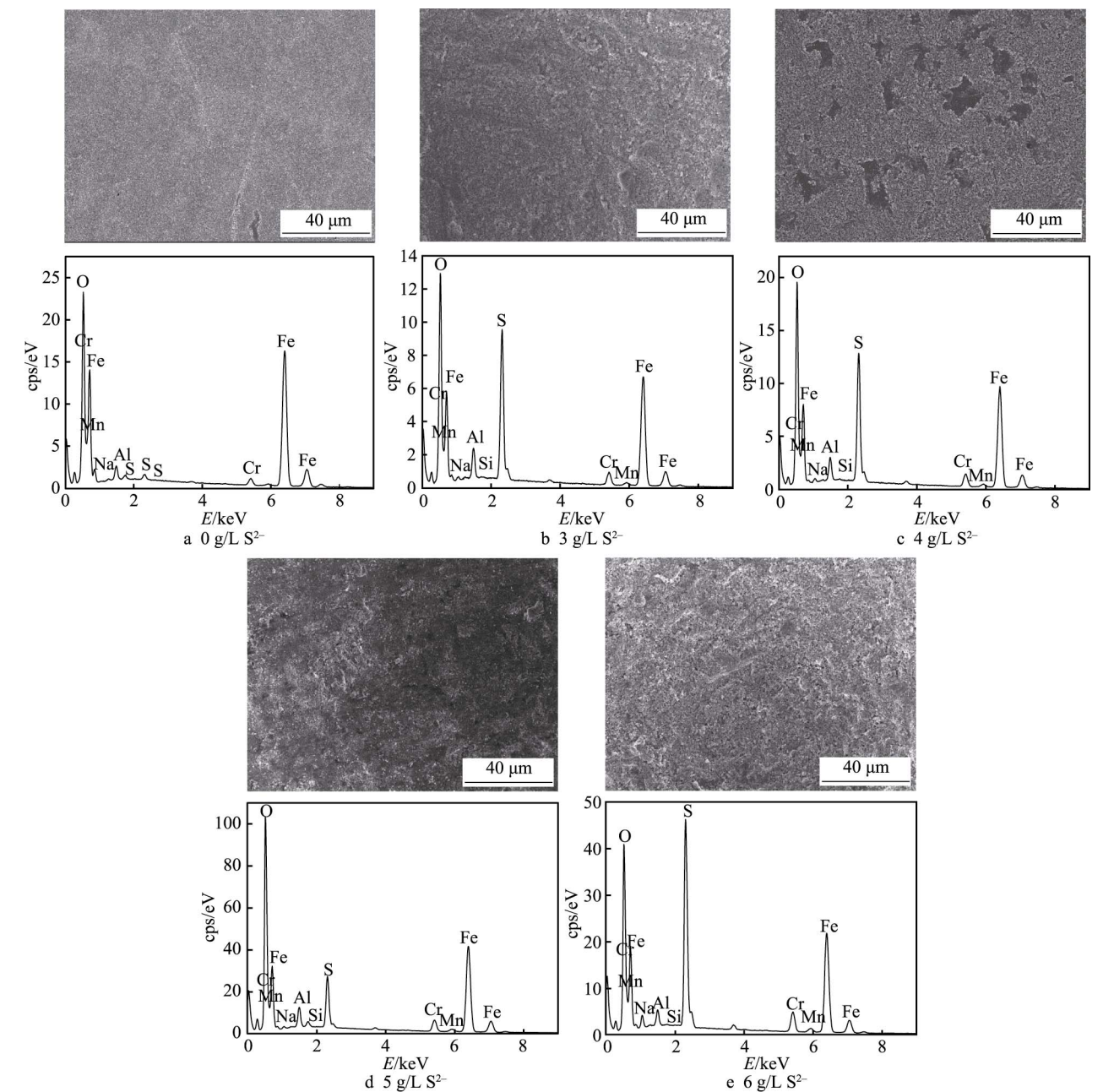


图 2 20Cr 钢腐蚀产物形貌及腐蚀产物能谱图（面扫）
Fig.2 Morphologies and energy spectra of corrosion products of 20Cr steel (surface scan)

表 2 不同 S^{2-} 浓度下腐蚀产物的 EDS 能谱分析结果（面扫）
Tab.2 EDS spectrum analysis results of corrosion products at different S^{2-} concentrations (surface scan)

Concentration of $\text{S}^{2-}/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	wt. %							
	O	Na	Al	Si	S	Cr	Mn	Fe
0	16.97	0.33	1.30	0.30	0.00	1.88	0.33	78.89
3	20.96	0.58	2.40	0.05	12.19	3.42	0.48	59.93
4	21.75	0.60	2.01	0.06	11.77	3.93	0.54	59.34
5	25.04	0.46	2.05	0.48	5.51	4.04	0.61	61.82
6	19.33	1.62	1.19	0.04	16.78	5.69	0.60	54.74

2.1.2 腐蚀产物的物相分析

通过 SEM 与 EDS 的检测结果只能了解材料微区成分元素的种类与含量,为进一步明确腐蚀产物的具体组成,利用 XRD 对腐蚀试样的腐蚀产物进行物相

分析。对在未添加硫元素的铝酸钠溶液和添加 5 g/L S^{2-} 的铝酸钠溶液中高温浸泡腐蚀 5 d 的 20Cr 试样进行 XRD 分析。如图 3 所示,20Cr 试样在未添加硫元素的铝酸钠溶液中高温浸泡腐蚀 5 d 后,检测到的

20Cr 试样表面的腐蚀产物主要为 Fe_3O_4 和 FeOOH ；相对于未添加硫元素的铝酸钠溶液，20Cr 试样在含 5 g/L S^{2-} 的铝酸钠溶液中腐蚀 5 d 后， FeOOH 峰消失，腐蚀产物中 Fe_3O_4 衍射峰更明显，表明 Fe_3O_4 含量略微升高，同时还存在 FeCr_2O_4 和少量疏松结构的 $\text{FeS}^{[23]}$ 。

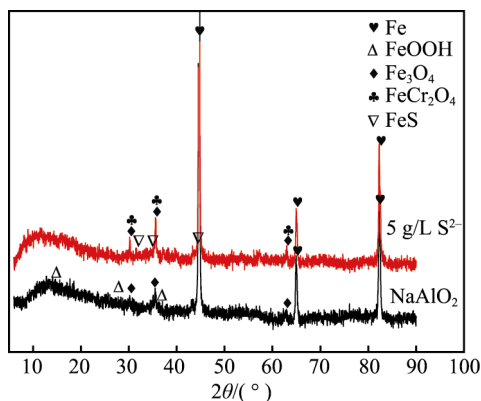


图 3 20Cr 钢高温浸泡腐蚀 5 d 后腐蚀产物 XRD 图
Fig.3 XRD patterns of corrosion products of 20Cr steel after 5 days immersion corrosion

2.2 腐蚀失重分析

图 4 为 20Cr 钢材在不同 S^{2-} 浓度的铝酸钠溶液中腐蚀 5 d 后的腐蚀失重曲线，从图 4 可以看出，随着硫离子浓度的增加，20Cr 钢试样的腐蚀速率呈现先增加后减小的趋势。在 $0\sim 3 \text{ g/L}$ 阶段，腐蚀速率随着 S^{2-} 浓度的增加而急剧增大。 S^{2-} 质量浓度为 $3\sim 5 \text{ g/L}$ 时，腐蚀速率的增加趋势减缓，20Cr 试样的腐蚀失重持续增加，表明随着 S^{2-} 浓度的增加，生成的腐蚀产物覆盖于试样表面，在一定程度上阻碍了腐蚀介质与基体的直接接触，从而减缓腐蚀速率。 S^{2-} 质量浓度为 5 g/L 时，基体最易被腐蚀； S^{2-} 质量浓度为 $5\sim 6 \text{ g/L}$ 时，腐蚀速率急剧下降，这是由于试样表面生成的氧化物形成了具有一定厚度的致密钝化层，溶液无法与金属直接接触，导致腐蚀速率降低，阻碍腐蚀的进行。

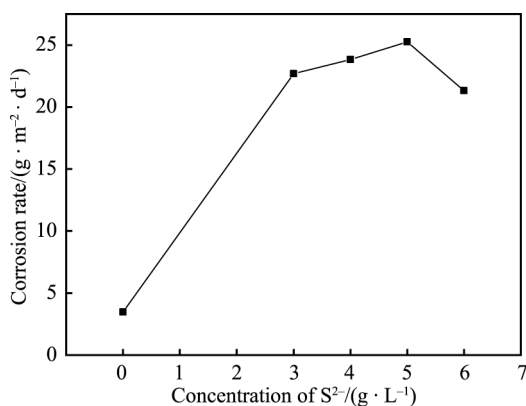


图 4 不同 S^{2-} 浓度铝酸钠溶液中 20Cr 钢材的腐蚀失重曲线

Fig.4 Corrosion weight loss curve of 20Cr steel in different S^{2-} concentrations of sodium aluminate solution

2.3 腐蚀电化学

2.3.1 极化曲线

为进一步确定不同 S^{2-} 浓度铝酸钠溶液中 20Cr 钢的腐蚀行为，进行同腐蚀介质的高温浸泡电化学实验，测得不同 S^{2-} 浓度的铝酸钠溶液中 20Cr 钢的极化曲线如图 5 所示，通过塔菲尔拟合得到拟合数据如表 3 所示。

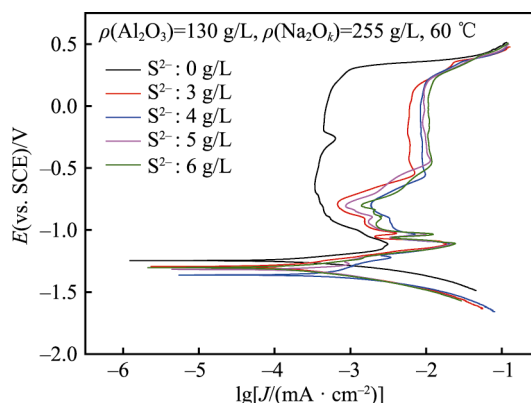


图 5 20Cr 钢在不同 S^{2-} 浓度下的极化曲线
Fig.5 Polarization curves of 20Cr steel at different S^{2-} concentrations

表 3 20Cr 钢在不同 S^{2-} 浓度下极化曲线的拟合数据
Tab.3 Data fitting of polarization curves for 20Cr steel at different S^{2-} concentrations

Concentration $/(g \cdot L^{-1})$	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$V_{\text{corr}}/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$
0	-1201.6	22.87	0.2691
3	-1256.0	154.13	1.8129
4	-1316.9	167.73	1.9729
5	-1279.2	586.02	6.8928
6	-1264.4	183.06	2.1532

由图 5 和表 3 可以明显看出，20Cr 钢打磨光洁表面经浸泡后，其腐蚀电流密度随铝酸钠溶液中 S^{2-} 浓度的增加，先增大再减小。 S^{2-} 质量浓度为 0 g/L 时，腐蚀电流密度为 $22.872 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，在此浓度下可以由极化曲线看出所对应的钝化区域较宽，由物相分析可知，在强碱性溶液中能稳定存在的物相主要为 Fe_3O_4 ，此时腐蚀速率较慢。 S^{2-} 质量浓度为 $3\sim 4 \text{ g/L}$ 时，电流密度平稳增长，从 0 g/L 时的 $22.872 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 增到 4 g/L 时的 $167.73 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，腐蚀加快； S^{2-} 质量浓度为 5 g/L 时，腐蚀电流密度达到最大值，为 $586.02 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，腐蚀速率最快。原因在于钢在碱性溶液中的腐蚀产物 Fe_3O_4 会与 S^{2-} 发生反应^[23]，反应生成物结构不稳定，起不到保护作用，由此加快了腐蚀介质与试样表面之间的物质交换。 S^{2-} 质量浓度在 $5\sim 6 \text{ g/L}$ 期间，腐蚀电流密度随着浓度的增加而出现降低的趋势，这是由于有电极表面钝化膜的产生，对腐蚀具有一定的阻碍作

用。由此推导出, 20Cr 钢试样的电化学趋势与对其进行实验所得的腐蚀形貌表征、能谱分析、物相分析以及腐蚀失重分析等分析结果相符合。

2.3.2 交流阻抗图

避免电化学测试单一性, 使得结论更加严谨, 在极化曲线测定之后, 还给出了 20Cr 钢在不同 S^{2-} 浓度的铝酸钠溶液中腐蚀 5 d 后的交流阻抗图 (EIS), 如图 6 所示。通常判定抗腐蚀性以容抗弧半径大小为依据^[24], 相比之下, 容抗弧半径大则防腐性优异。从图 6 可以明显看出, 容抗弧半径随腐蚀溶液中 S^{2-} 浓度的增加, 出现先逐渐减少后增加的趋势, S^{2-} 质量浓度为 5 g/L 时, 达到最小; S^{2-} 质量浓度为 5~6 g/L 时, 容抗半径明显增大。表明 20Cr 钢在铝酸钠溶液中, S^{2-} 质量浓度为 5 g/L 时, 试样最容易被腐蚀。

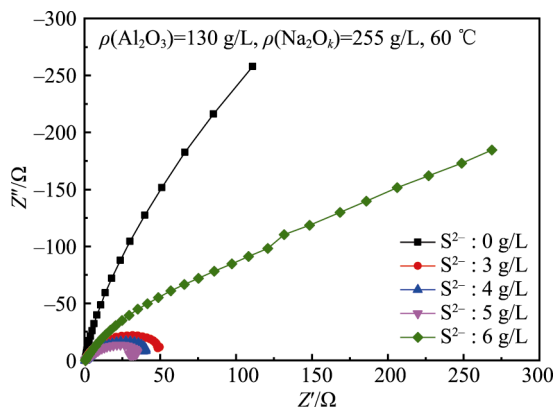


图 6 不同 S^{2-} 浓度铝酸钠溶液中腐蚀 5 d 后的 20Cr 钢 Nyquist 曲线

Fig.6 Nyquist curves of 20Cr steel after 5 days immersion corrosion indifferent S^{2-} concentrations of sodium aluminate solution

图 7 为 Nyquist 曲线的等效电路图模型。 Q_1 表示腐蚀产物双电层电容, R_1 为腐蚀介质电阻, R_2 是腐蚀产物层电阻 (用来表征腐蚀速率的电荷转移的电阻)。对 Nyquist 曲线进行拟合, 得到 20Cr 钢工作电极极化电阻 R_p 随不同 S^{2-} 浓度的变化情况, 如图 8 所示。根据 R_p 变化判定腐蚀行为, 从图 8 中可以看出, S^{2-} 浓度影响着阻抗值变化, 表现出其随 S^{2-} 浓度的增加而先减小再增加的趋势。后者的增长趋势与 EIS 中容抗弧的增长趋势一致, 并与腐蚀速率的变化相对应。

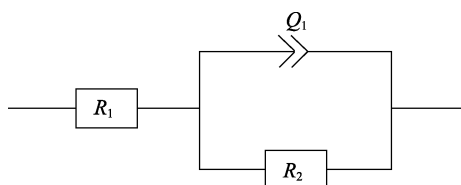


图 7 不同 S^{2-} 浓度铝酸钠溶液中腐蚀 5 d 后 20Cr 钢的 Nyquist 曲线等效电路图

Fig.7 Equivalent circuit of Nyquist curve of 20Cr steel after 5 days immersion corrosion indifferent S^{2-} concentrations of sodium aluminate solution

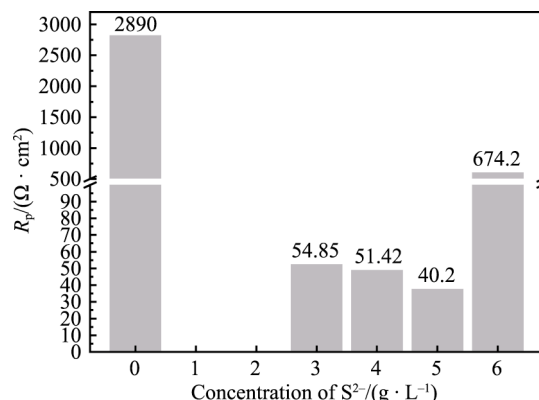


图 8 20Cr 钢工作电极电荷转移电阻 R_p 随 S^{2-} 浓度的变化
Fig.8 Change of charge transfer resistance R_p of 20Cr steel working electrode with different S^{2-} concentrations

3 结论

1) S^{2-} 浓度增加, 腐蚀产物增多, 表面平整度降低, 变蓬松状; 腐蚀速率在未添加 S^{2-} 时达到最低值。这意味着 $NaAlO_2$ 溶液中 S^{2-} 的存在加速了 20Cr 钢的腐蚀, 并且在 S^{2-} 质量浓度为 5 g/L 时, 腐蚀速率达到峰值。

2) EDS 和 XRD 分析表明, 在含硫铝酸钠溶液中, 相对致密的腐蚀产物 Fe_3O_4 结构被 S^{2-} 破坏, 钝化膜的形成受到阻碍, 且随着 S^{2-} 质量浓度升到 5 g/L, 破坏作用更明显。 S^{2-} 质量浓度大于 5 g/L 时, 再次形成结构致密的腐蚀产物 $FeCr_2O_4$ 膜, 阻碍了腐蚀的进行。

3) 极化曲线分析和交流阻抗曲线分析表明, 腐蚀电流密度由不加 S^{2-} 时的 $22.872 \mu A/cm^2$ 增加到 5 g/L 时的 $586.02 \mu A/cm^2$, 6 g/L 时减小到 $183.06 \mu A/cm^2$, 同时极化电阻 R_p 也随之先减小后增大。这表明随着 S^{2-} 浓度增大, 在铝酸钠溶液中 20Cr 钢的腐蚀速率先增大后减小, S^{2-} 质量浓度为 5 g/L 时, 试样最易被腐蚀。

参考文献:

- [1] 贾永真, 王家伟, 李军旗, 等. 硫含量对铝酸钠种分母液盐蒸发结晶析出的影响[J]. 过程工程学报, 2013, 13(5): 801-806.
JIA Yong-zhen, WANG Jia-wei, LI Jun-qi, et al. Effect of sulfur content on evaporation crystallization precipitation of salts in sodium aluminate seeded precipitation mother solution[J]. The Chinese journal of process engineering, 2013, 13(5): 801-806.
- [2] 姬天哲. 高硫铝土矿选矿脱硫方法研究[J]. 中国金属通报, 2018(2): 208-210.
JI Tian-zhe. Study on desulfurization method of high sulfur bauxite ore dressing[J]. China metal bulletin, 2018(2): 208-210.
- [3] 王鹏, 魏德洲. 高硫铝土矿脱硫技术[J]. 金属矿山, 2012(1): 108-110.
WANG Peng, WEI De-zhou. Desulfuration technique res-

- earch of high-sulfurbauxite[J]. Metal mine, 2012(1): 108-110.
- [4] KENNEL G F, EVITTS R W, HEPPNER K L. A critical crevice solution and IR drop crevice corrosion model[J]. Corrosion science, 2008, 50(6): 1716-1725.
- [5] 胡小莲, 陈文汨. 采用湿式氧化法脱除铝酸钠溶液中硫的研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(10): 2911-2916.
- HU Xiao-lian, CHEN Wen-ni. Desulfurization from sodium aluminate solution by wet oxidation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(10): 2911-2916.
- [6] 刘龙. 高硫铝土矿溶出过程脱硫的研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2017.
- LIU Long. Study on desulphurization of high sulfur bauxite in the process of dissolution[D]. Guizhou: Guizhou University, 2017.
- [7] 郑立聪, 谢克强, 刘战伟, 等. 一水硬铝石型高硫铝土矿脱硫研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(5): 84-93.
- ZHENG Li-cong, XIE Ke-qiang, LIU Zhan-wei, et al. Review on desulfurization of high-sulfur bauxite[J]. Materials review, 2017, 31(5): 84-93.
- [8] WANG Wei, SUN Hu-yuan, SUN Li-juan, et al. Numerical simulation for crevice corrosion of 304 stainless steel in sodium chloride solution[J]. Chemical research in Chinese Universities, 2010, 26(5): 822-828.
- [9] BETOVA I, BOJINOV M, HYÖKYVIRTA O, et al. Effect of sulphide on the corrosion behavior of AISI 316L stainless steel and its constituent elements in simulated kraft digester conditions[J]. Corrosion science, 2010, 52(4): 1499-1507.
- [10] 杜一俭. 石油化工装置中硫腐蚀机理分析[J]. 科技创新与应用, 2012(13): 33-34.
- DU Yi-jian. Analysis of sulfur corrosion mechanism in petrochemical plants[J]. Technology innovation and application, 2012(13): 33-34.
- [11] LIU Z, MA W, YAN H, et al. Removal of sulfur by adding zinc during the digestion process of high-sulfur bauxite[J]. Scientific reports, 2017, 7(1): 17181.
- [12] 杨夏琼, 陈朝轶, 李军旗, 等. 硫对钢材碱性腐蚀的研究综述[J]. 表面技术, 2015, 44(9): 89-95.
- YANG Xia-qiong, CHEN Chao-yi, LI Jun-qi, et al. Review on sulfur corrosion of steel in alkaline environment[J]. Surface technology, 2015, 44(9): 89-95.
- [13] 李杏飞, 柯秀芳, 梁其锋, 等. 254SMo 和 TP317L 不锈钢在造纸中水环境下的腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(1): 50-54.
- LI Xing-fei, KE Xiu-fang, LIANG Qi-feng, et al. Corrosion behavior of 254SMo and TP317L stainless steels in papermaking intermediate water environment[J]. Corrosion science and protection technology, 2014, 26(1): 50-54.
- [14] 田源, 张库. 长庆长输油气管道 X80 钢腐蚀调查分析[J]. 云南化工, 2018, 45(7): 16-17.
- TIAN Yuan, ZHANG Ku. Investigation and analysis on the corrosion of X80 steel in the Changqing long oil and gas pipeline[J]. Yunnan chemical technology, 2018, 45(7): 16-17.
- [15] 张湘黔, 陈朝轶, 李军旗. $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 对 16Mn 钢材在碱性溶液中的腐蚀影响研究[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 122-125.
- ZHANG Xiang-qian, CHEN Chao-yi, LI Jun-qi. Effect of $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ on the corrosion behavior of 16Mn steel in alkaline solution[J]. Surface technology, 2015, 44(3): 122-125.
- [16] 权变利, 李军旗, 陈朝轶. 硫对碳钢材料腐蚀性能影响的研究现状与进展[J]. 热加工工艺, 2015, 44(12): 10-14.
- QUAN Bian-li, LI Jun-qi, CHEN Chao-yi. Research status and development of effect of sulfur on corrosion resistance of carbon steel[J]. Hot working technology, 2015, 44(12): 10-14.
- [17] 付慧, 陈朝轶, 李军旗, 等. 硫代硫酸钠对 Q235 钢碱性腐蚀行为的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(8): 87-90.
- FU Hui, CHEN Chao-yi, LI Jun-qi. Effect of sodium thiosulfate on corrosion behavior of Q235 steel in alkaline solution[J]. Hot working technology, 2017, 46(8): 87-90.
- [18] 吴考民, 王可中, 石鑫, 等. 含硫原油对输油管道的腐蚀性[J]. 油气储运, 2010(8): 616-618.
- WU Kao-min, WANG Ke-zhong, SHI Xin, et al. Corrosivity of sour crude on oil pipelines[J]. OGST, 2010(8): 616-618.
- [19] 吕详鸿, 赵国仙, 张建兵, 等. 超级 13Cr 马氏体不锈钢在 CO_2 及 $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$ 环境中的腐蚀行为[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(2): 207-212.
- LYU Xiang-hong, ZHAO Guo-xian, ZHANG Jian-bing, et al. Corrosion behaviors of super 13Cr martensitic stainless steel under CO_2 and $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$ environment[J]. Journal of Beijing University of Science and Technology, 2010, 32(2): 207-212.
- [20] MALKA R, NESIC S, GULINO D A. Erosion-corrosion and synergistic effects in disturbed liquid-particle flow[J]. Wear, 2007, 262: 791-799.
- [21] UEDA M, TAKABE H. The formation behavior of corrosion protective films of low Cr bearing steels in CO_2 environments[J]. Annals of surgery, 2001, 244(5): 700-705.
- [22] 杨德均, 沈卓身. 金属腐蚀学 [M]. 第二版. 北京: 冶金工业出版社, 1999: 124.
- YANG De-jun, SHEN Zhuo-shen. Corrosion science of metal[M]. 2nd Ed. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1999: 124.
- [23] 谢巧玲, 陈文汨. 铝酸钠溶液中 S^{2-} 对低合金钢腐蚀行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(12): 3462-3469.
- XIE Qiao-ling, CHEN Wen-lei. Effect of S^{2-} on corrosion behavior of low alloy steel in sodium aluminate solution[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2013, 23(12): 3462-3469.
- [24] HU P, SONG R, LI X J, et al. Influence of concentrations of chloride ions on electrochemical corrosion behavior of titanium-zirconium-molybdenum alloy[J]. Journal of alloys & compounds, 2017, 70(8): 367-372.